УДК 523.982.8:519.237

Дмитрий Речкин

Невидимая динамика солнечной активности

1. Материал и методы

1.1. Наблюдаемые циклы солнечной активности, числа Вольфа

Теперь уже ни для кого не секрет, что центральное тело нашей Солнечной системы, *звезда по имени Солнце*[1], живет своей собственной, не всегда понятной для нас, но очень активной и насыщенной жизнью. Желающие изучать эту активность неизбежно столкнутся с огромными объемами накопленных данных (прежде всего – многовековыми данными астрономических наблюдений). Рудольф Вольф[2], заинтересовавшийся открытой Генрихом Швабе[3] периодичностью количества наблюдаемых солнечных пятен, собрал все доступные с 1610 года данные, и дополнил их собственными наблюдениями. В 1848 году он предложил собственный метод расчета числового показателя солнечной активности; получаемые по этой методике значения получили название *чисел Вольфа*. В 1849 году официальную публикацию чисел Вольфа начала Цюрихская обсерватория.

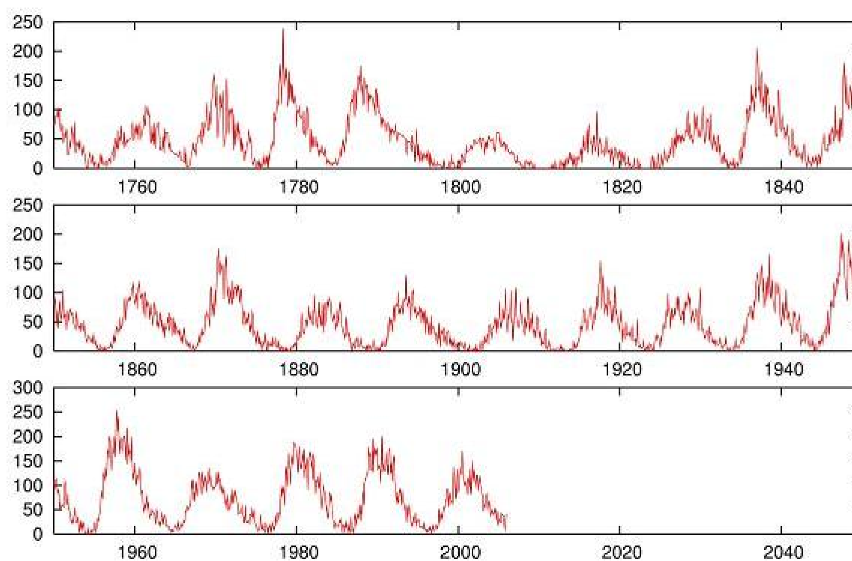


Рис.1. График среднемесячных чисел Вольфа с 1750 года

Р.Вольф первым вычислил периодичность цикла солнечной активности, определив его в 11,1 лет. В дальнейшем стало понятно, что цикл не всегда является строго «одиннадцатилетним», так, в XX веке продолжительность солнечного цикла оказывается ближе к 10,5 годам. Совре-

---

[1] В.Р.Цой «Звезда по имени Солнце» – М: «Эксмо-пресс», 2002

[2] Вольф, Иоганн Рудольф (*нем.* Johann Rudolf Wolf), 7 июля 1816 – 6 декабря 1893; швейцарский астроном и математик; профессор астрономии Бернского университета (1844), директор Бернской обсерватории (1847), профессор астрономии в Университете и Высшей технической школе Цюриха (1855); член Французской академии наук (1885).

[3] Швабе, Самуэль Генрих (*нем.* Samuel Heinrich Schwabe), 25 октября 1789 – 11 апреля 1875; немецкий аптекарь, ботаник и астроном; систематически вел наблюдения за солнечными пятнами, в 1843 году обнаружил закономерность в изменении их числа; открытие получило широкую известность только благодаря Александру Гумбольдту, включившему данные наблюдений Швабе в третий том своего труда «Космос» (1851); лауреат Золотой медали Лондонского королевского общества (1857), иностранный член Лондонского королевского общества (1868).

менные исследователи говорят не об *«11-летнем»*, но скорее о *«22-летнем»* цикле активности, напоминая, что после каждого 11-летнего периода активности магнитные полюса Солнца меняются местами, и к «исходному состоянию» наше светило возвращается не каждые 11 лет, а примерно каждые 22 года. Поэтому в расчетах используется концепция 22-летнего цикла активности Солнца.

Исследование динамику солнечной активности (пусть и по косвенным, усредненным показателям) математическими методами ставит цель наглядно продемонстрировать возможности таких методов, а также поставить вопросы о применимости метода к исследованиям динамики других показателей, полученных прямыми астрономическими, астрофизическими и радиоастрономическими наблюдениями (измерениями).

1.2. STATIC/EX – КАЛЬКУЛЯТОР МНОГОМЕРНОЙ СТАТИСТИКИ

Идея многомерных статистических расчетов на основе матрицы данных, образованной строками-объектами и столбцами-признаками является настолько общепринятой, что не нуждается ни в установлении приоритета, ни в каких-либо формальных доказательствах. Необходимость построения сложных алгоритмов обработки данных последовательным применением известного набора стандартных преобразований привела к разработке языка *ЯКОБИ*[4], в основе которого лежат принцип директив выбора преобразований, применяемых к матрице данных, а также оригинальный способ указания выборки объектов и/или признаков (фрагмента матрицы данных), к которым применяются определяемые директивами преобразования.

Директивы *ЯКОБИ* представляют собой фразы на языке, приближенном к естественному, что делает понятной схему формирования и обработки данных. Лаконичный способ вывода результатов вычислений позволяет представить их как в численном (в виде таблиц и матриц), так и в графическом (псевдографическом) виде, что максимально облегчает их восприятие и дальнейшее использование.

Первая реализация *ЯКОБИ* для электронно-вычислительной машины (ЭВМ) БЭСМ-6 была выполнена В.М.Ефимовым. Необходимость расширения круга пользователей привела к реализации *ЯКОБИ* для мини-ЭВМ «Электроника-60» (клон PDP-11/05, Digital Equipment Company). Пакет STATIC[5] обеспечивал необходимые вычисления, несмотря на микроскопический по современным меркам объем оперативной памяти (*56 килобайт!*) и практически полное отсутствие вспомогательных средств (таких, например, как средства работы с электронными таблицами, обычные для офисных систем).

В настоящее время реализация STATIC/EX является общедоступной[6], она выполнена в среде *Lazarus*[7] для *Free Pascal Compiler* (FPC[8]) и опубликована[9,10] в виде полного комплекта исходных текстов. Нумерация версий – сквозная с момента первой реализации STATIC, в настоящее время актуальна версия 1.09, которая и применялась для выполнения всех расчетов, положенных в

---

4 В.М.Ефимов, Д.В.Речкин «ЯКОБИ – входной язык пакетов прикладных программ статистической обработки биологических данных» – науч.-техн.бюл./ВАСХНИЛ, Сиб.отд-ние, вып.48, с.12-17. – Новосибирск: 1985

5 Д.В.Речкин «Реализация входного языка ЯКОБИ для мини-ЭВМ “Электроника-60”. Пакет STATIC» – науч.-техн.бюл./ВАСХНИЛ, Сиб.отд-ние, вып.48, с.18-24. – Новосибирск: 1985

6 Текущая реализация STATIC/EX подробно описана здесь: http://groups.io/g/static

7 Lazarus: The professional Free Pascal RAD IDE – http://www.lazarus-ide.org

8 Free Pascal: Open source compiler for Pascal and Object Pascal – http://www.freepascal.org

9 http://sourceforge.net/projects/jacobi-static

10 https://u.to/yT35GQ

основу данной работы. Калькулятор STATIC/EX является консольным мульти-платформенным приложением (здесь использована сборка для платформы *Windows x86-32bit*).

2. ТРАДИЦИЯ: ПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И СКОЛЬЗЯЩЕЕ СРЕДНЕЕ

Как известно (см. **Рис.1**), за период с 1700 по 2019 год наблюдалось 24,5 цикла солнечной активности. Иными словами, если исходить из этих данных, продолжительность цикла составит 13,06 года, что, вообще говоря, сильно отличается от ожидаемого значения. Поэтому для расчета интересующей нас продолжительности цикла применим другой подход.

Рассчитаем корреляции между текущим годом солнечного цикла и предшествующими годами; для того, чтобы свести к минимуму погрешность вычислений, будем отслеживать корреляции на протяжении как минимум 150 лет наблюдений (не менее 11-12 наблюдаемых циклов).

Расчет выполнялся по программе ***wolf-long.jac*** (см. **Приложение П2.1**). Результаты показаны в **Табл.1**:

Табл.1. Влияние предшествующих лет в циклах солнечной активности

Год	–0	–1	–2	–3	–4	–5	–6	–7	–8	–9
0	**1,000**	0,811	0,421	-0,043	-0,415	-0,606	-0,571	-0,340	0,018	0,416
–10	0,705	**0,765**	0,583	0,237	-0,148	-0,448	-0,578	-0,527	-0,309	0,027
–20	0,366	0,607	**0,654**	0,485	0,153	-0,201	-0,474	-0,578	-0,487	-0,257
–30	0,045	0,336	**0,518**	0,505	0,308	0,006	-0,294	-0,484	-0,516	-0,392
–40	-0,167	0,089	0,285	**0,356**	0,304	0,145	-0,073	-0,268	-0,402	-0,441
–50	-0,371	-0,204	-0,013	0,146	**0,214**	0,196	0,082	-0,072	-0,233	-0,347
–60	-0,358	-0,269	-0,112	0,044	0,149	**0,165**	0,103	0,003	-0,105	-0,183
–70	-0,200	-0,151	-0,080	-0,014	0,049	0,088	**0,107**	0,097	0,055	0,017
–80	-0,007	-0,017	-0,027	-0,026	-0,005	0,055	0,137	0,201	**0,213**	0,172
–90	0,097	0,011	-0,064	-0,121	-0,122	-0,057	0,057	0,175	0,249	**0,255**
–100	0,183	0,059	-0,061	-0,154	-0,185	-0,143	-0,035	0,106	0,251	**0,348**
–110	0,339	0,232	0,052	-0,120	-0,244	-0,285	-0,245	-0,120	0,069	0,270
–120	**0,393**	0,372	0,213	-0,011	-0,222	-0,345	-0,359	-0,266	-0,104	0,084
–130	0,257	**0,335**	0,281	0,126	-0,060	-0,230	-0,330	-0,346	-0,287	-0,168
–140	-0,023	0,110	**0,193**	0,190	0,090	-0,060	-0,190	-0,265	-0,276	-0,243

Интерес представляют только положительные корреляции, поскольку они помогают определить соответствие максимума активности в текущем цикле с максимумами в предыдущих циклах. Для облегчения восприятия такие коэффициенты корреляции выделены жирным шрифтом.

Очевидно, вычисленные корреляции показывают (за вычетом 150 начальных лет) наличие 13 циклов, с продолжительностью (в годах): 11, 11, 10, 11, 11, 11, 11, 12, 11, 10, 11, 11 и 11 лет (всего 142). Таким образом, средняя продолжительность цикла оказывается равной 142/13 = **10,92 года**.

Традиционные представления о динамике солнечной активности базируются на том, что: **(а)** активность является периодической (в соответствии с тригонометрической функцией типа ***Sin*** или ***Cos***), **(б)** «истинная» активность представляет собой огибающую, сглаживающую месячные (годичные) различия соответствующих чисел Вольфа.

Аргумент тригонометрической функции за период, соответствующий циклу активности, изменяется от 0 до 2**π**, соответственно, годичное приращение аргумента составит для традиционной модели 2**π**/10,92 = **0,5754** с достаточной для расчетов точностью. Скользящее среднее вычисляем за 10 предшествующих лет и текущий год (округляя полученную среднюю продолжительность цикла 10,92 до 11). Полученное значение скользящего среднего (для каждого года) мо-

дулируем значением тригонометрической функции, ожидая получить картину, похожую на поведение значений чисел Вольфа за те же годы.

Расчет выполнялся по программе ***wolf-trad.jac*** (см. **Приложение П2.2**). Результаты в графической форме показаны на **Рис.2**:

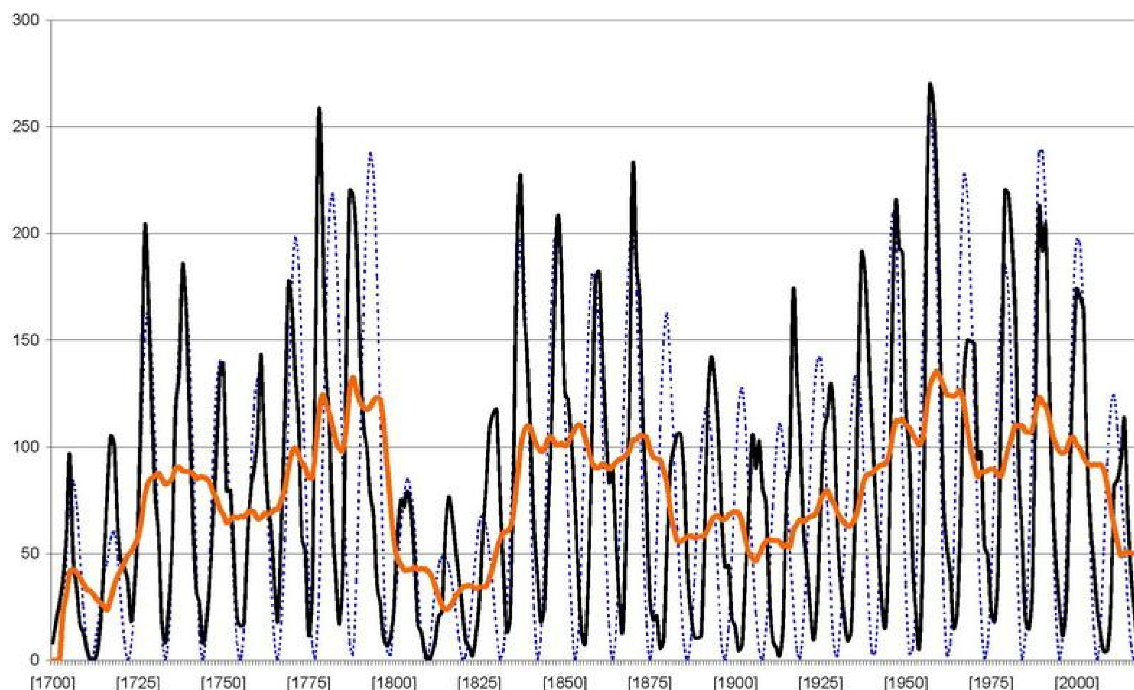


Рис.2. Исходный ряд среднегодовых чисел Вольфа и традиционная модель

Черная линия показывает динамику солнечной активности (среднегодовые числа Вольфа) с 1700 по 2019 годы, оранжевая – отображает график скользящего среднего (с учетом 11 лет, текущего и 10 предшествующих). Синим пунктиром показан результат моделирования динамики модуляцией скользящего среднего тригонометрической функцией (***Sin***) с учетом известного смещения фазы.

Казалось бы, чего же ещё желать исследователю? Модельный график неплохо согласуется с данными наблюдений, выведен интегральный показатель активности (величина скользящего среднего)… Задача решена, не так ли?

Оказывается – нет. В ходе исследования была совершена немалая методическая ошибка, а именно: в модель было привнесено извне желаемое толкование исследуемой динамики… то самое «скользящее среднее». Кроме того, часть важной информации была отброшена предположением, что «там нет никакой другой причины колебаний, кроме периодичности, задаваемой тригонометрической функцией». А в результате – желаемое было выдано за действительное. Истинная причина осталась за пределами понимания, а ведь поиск (и открытие) такой причины – основная, если не главная задача исследователя.

3. Новация: поиск внутренних закономерностей

Начнем сначала. В исследуемой динамике солнечной активности изначально содержится информация, которую надо извлечь и, по возможности, наглядно продемонстрировать. Однако на этом пути возникает ряд сложностей.

Проблема первая: для изучения внутренних закономерностей ряда чисел Вольфа не надо привлекать (во всяком случае – пока, руководствуясь незыблемым *принципом «бритвы Оккама»*) никаких других сведений. Значит, решение надо искать через возможные преобразования представления самого ряда.

Проблема вторая: для подобного исследования недостаточно простого, «одномерного» представления ряда… *Volens-nolens*, придется переходить от плоских графиков вида «годы» – «значения» к объемным, «многомерным» фигурам.

Проблема третья: до сих пор было непонятно, что это за фигуры, и как их сначала построить, а потом – и увидеть.

Представим исходный ряд среднегодовых чисел Вольфа ($\boldsymbol{w}$) как последовательность ($\boldsymbol{w}_{1700}$, $\boldsymbol{w}_{1701}$, …, $\boldsymbol{w}_{2019}$). Для того, чтобы учесть предысторию, заменим в этом ряду каждое одномерное значение $\boldsymbol{w}_{i}$ вектором $\boldsymbol{W}_{i} = \{ \boldsymbol{w}_{i} , \boldsymbol{w}_{i-1} , \dots , \boldsymbol{w}_{i-21} \}$, то есть дополним значение числа Вольфа текущего года предшествующими (за 21 год) значениями. Видимо, не лишним будет напоминание о том, что «истинной» продолжительностью цикла солнечной активности следует считать не 11, а именно 22 года, с учетом изменения полярности магнитного поля Солнца[11].

В результате получим матрицу, строки которой (объекты, в принятых терминах многомерной статистики) будут соответствовать точкам в многомерном (размерности 22) пространстве. Вся совокупность таких точек образует опорные точки некой кривой, описывающей динамику исследуемого процесса. Осталось немного – «увидеть» эту кривую. Хотя, конечно, «видеть» в 22-мерном пространстве человеку (с его привычным 2,5-мерном представлением об окружающем мире) довольно-таки затруднительно. Однако заметим – с преобразованием исходного «плоского» ряда Вольфа к его многомерному аналогу первые две проблемы оказались преодолены.

3.1. К наглядности через понижение размерности

Очевидно, чтобы «увидеть» ход процесс в многомерном пространстве, надо предварительно преобразовать это пространство к такому виду, где количество значимых измерений существенно меньше количества исходных признаков (столбцов матрицы данных). Для понижения размерности пространства существует несколько методов, из которых для наших целей вполне годится метод главных компонент[12], фактически «изобретенный» Карлом Пирсоном[13] опиравшимся на разработанный Джеймсом Сильвестером[14] математический аппарат.

Суть метода применительно к нашей задачи: в исходной матрице данных информация «размазана» между признаками, образующими неортогональное пространство. Другими словами, исходные признаки как-то коррелируют между собой, в результате чего вариации одного признака оказываются связанными с вариациями других. При этом информативность каждого из признаков (определяемая через их дисперсию) практически не отличается от информативности любого из остальных признаков.

Процедура преобразования («поворота») пространства методом главных компонент такова:

1) вычисление матрицы парных корреляций между значениями признаков,
2) разложение полученной матрицы корреляций на матрицу собственных векторов и вектор собственных чисел,
3) «поворот» исходной матрицы данных перемножением ее на матрицу собственных векторов и вектор собственных чисел (упорядоченные по убыванию значений собственных чисел).

---

[11] Ю.И.Витинский, М.Копецкий, Г.В.Куклин «Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца» — М: Наука, 1986

[12] *англ.* Principal component analysis, PCA

[13] K.Pearson «On lines and planes of closest fit to systems of points in space» – Philosophical Magazine 2:559-572 (1901)

[14] J.J.Sylvester «On the reduction of a bilinear quantic of the nth order to the form of a sum of n products by a double orthogonal substitution» – Messenger of Mathematics, 19 (1889), 42-46

Таким образом, ранее существовавшие объекты получают в преобразованном пространстве новые координаты (соответствующие новым, вычисленным, осям) – но их относительное взаиморасположение не меняется.

Основным свойством пространства, описываемого матрицей собственных векторов, является его ортогональность; вариации по любому из собственных векторов (ортов) не влияют на вариации по остальным ортам. Дисперсия же распределяется между ортами неравномерно – «старшие» орты (имеющие меньшие номера) концентрируют больше дисперсии, чем «младшие». Распределение дисперсий по осям преобразованного пространства соответствует полученным в ходе преобразования собственным числам, в чем легко убедиться, распечатав соответствующие показатели в ходе вычислений.

Выбирая из всего полученного набора главных компонент лишь те «старшие», суммарная дисперсия которых меньше заданного порогового значения, можно исключить из рассмотрения те «младшие», информативность которых не повлияет на дальнейшие исследования.

3.2. Траектория процесса и её визуализация

Как уже говорилось, переход от «плоского» ряда чисел Вольфа к его многомерному аналогу, опирающемуся на представления годичных точек как векторов $\boldsymbol{W}_i = \{ \boldsymbol{w}_i , \boldsymbol{w}_{i-1} , \dots , \boldsymbol{w}_{i-21} \}$, создает вместо простого графика «годы» – «числа» многомерную кривую, опирающуюся на годичные точки. Для визуализации этой кривой достаточно выполнить ее проецирование на фазовые плоскости (главные компоненты), образованные ортами – собственными векторами. Важно отметить, что никаких новых предположений о характере изучаемого процесса при таком преобразовании *не делалось*, и никакие «желаемые» зависимости в исходные данные *не вносились*.

Для получения первого (наиболее очевидного) представления о динамическом процессе солнечной активности достаточно «нарисовать» хотя бы три проекции, на плоскости I-II, II-III и I-III главных компонент.

Отдельно следует рассмотреть «вклады» годов (строго говоря, лагов – «запаздываний») в полученные собственные векторы. Сумма квадратов всех вкладов для любого собственного вектора равна единице. Рассматривая вклады лагов в порядке убывания их абсолютного значения, можно оценить накопленную сумму; достижение заданного порога значимости можно воспринимать как сигнал к прекращению дальнейшего рассмотрения вкладов, и при толковании природы вариаций по данной оси преобразованного пространства ограничиться только набором уже отмеченных вкладов.

По всей видимости, проекция исходных признаков на фазовые плоскости главных компонент также имеет смысл, поскольку отражает (в данном случае) тенденции многолетних, повторяющихся изменений в характере влияния факторов изучаемого процесса на поведение динамической системы.

В изучение динамических процессов (временных рядов) методом главных компонент существенный вклад внес Вадим Ефимов[15], первым предложивший[16], в частности, методику последовательного соединения точек-объектов на дискретных проекциях непрерывной кривой. Автор выражает В.М.Ефимову глубокую искреннюю благодарность за возможность приобщения к идеям и методам многомерной статистики.

---

[15] В.М.Ефимов «Обработка временных рядов методом главных компонент» – науч.-техн.бюл./ВАСХНИЛ, Сиб.отд-ние, вып.22, с.32-40. – Новосибирск: 1984

[16] Ю.К.Галактионов, частное сообщение (1985)

4. Результаты

Вычисления проводились по программе ***wolf-nova.jac*** (см. **Приложение П2.3**). Полученные в ходе расчетов значения собственных чисел демонстрируют радикальное снижение размерности при переходе от исходного пространства признаков к пространству главных компонент (**Табл.3**):

Табл.3. Собственные числа (дисперсии компонент) для 22-летнего лага

	I	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	VII	VIII	IX	X	XI
Λ	7,25	7,03	2,88	1,23	0,97	0,91	0,39	0,32	0,32	0,17	0,11
%	32,97	31,95	13,07	5,60	4,42	4,15	1,79	1,46	1,45	0,77	0,50
Σ%	**32,97**	**64,92**	**77,99**	**83,59**	**88,02**	**92,16**	93,96	95,42	96,87	97,64	98,15

В приведенной таблице столбцы соответствуют главным компонентам (приведены 11 из 22, остальные компоненты не имеют существенного значения), **Λ** – значения собственных чисел, **%** – доля дисперсии, относящейся к соответствующей главной компоненте (в процентах), **Σ%** – накопленная доля дисперсии (в процентах). Жирным шрифтом выделены показатели накопленной доли дисперсии для I-VI главных компонент, в сумме описывающих не менее 90% общей вариации (порог информативности 0,90).

Очевидно, что основная доля дисперсии (соответственно, значительная доля информации о процессе) приходится на I-III главные компоненты. Посмотрим, как ведет себя процесс в новых, ортогональных координатах.

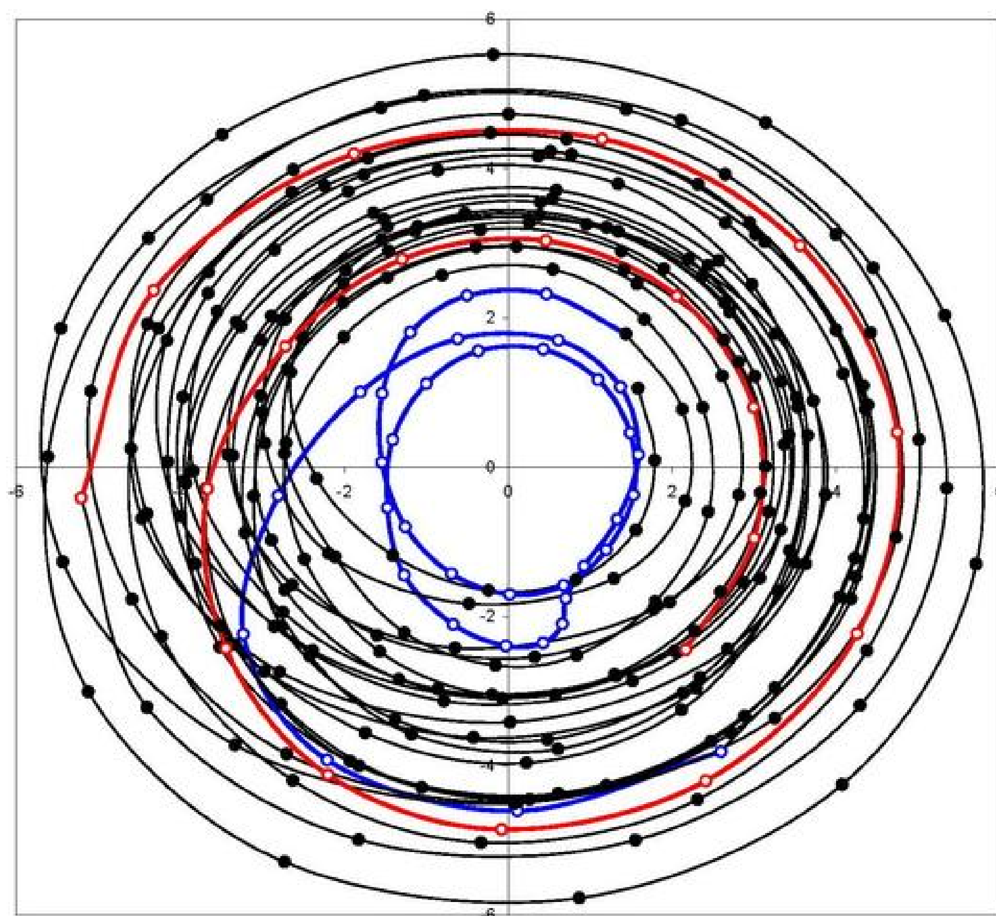


Рис.3. Проекция объектов (годы) на плоскость I-II главных компонент

На проекции годы отмечены точками, цветом выделены два периода, представляющие определенный исторический (и не только) интерес. Голубой линией отмечены годы, относящиеся к

так называемому «минимуму Далтона», во многом совпадающим с годами Великой Французской революции и последующими потрясениями, охватившими значительную часть Европы. Красной линией выделены годы после 2000-го, события которых известны большинству читателей не понаслышке.

Налицо явная цикличность процесса. Но только ли об этой, «лежащей на поверхности» цикличности говорят нам числа Вольфа? Взглянем на тот же процесс – «вид сбоку».

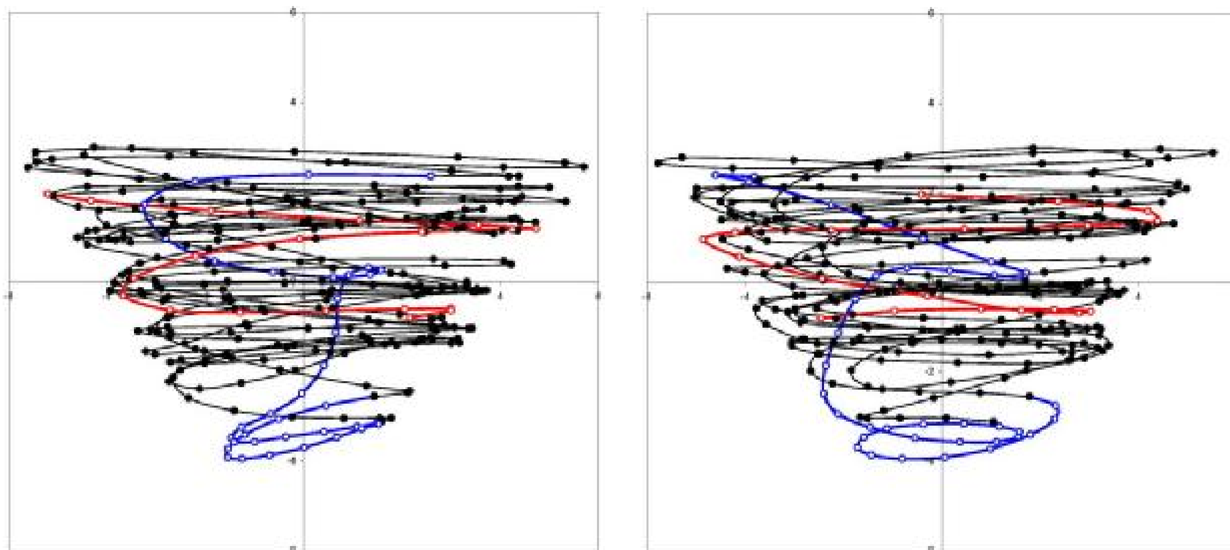


Рис.4. Проекция объектов на плоскость I-III (слева) и II-III (справа) главных компонент

Траектория выглядит так, словно воображаемая точка, характеризующая процесс во времени, «пробегает» по гипотетической «воронке», причём заметно – чем выше точка располагается по вертикальной координате (она же – III главная компонента), тем больше диаметр описываемой ею окружности. Что это, если не обобщённый показатель энергетики процесса?

Проверим, насколько смещения по вертикали соответствуют радиусу описываемой окружности. Как известно, радиус окружности $\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{x}^2+\boldsymbol{y}^2)^{1/2}$, где $\boldsymbol{x}$ и $\boldsymbol{y}$ – координаты точки в плоскости (I и II главных компонент). Вычислим этот радиус для каждой точки, и определим корреляцию между ним и соответствующим значением III главной компоненты. А заодно проверим, насколько этот показатель соответствует уже использовавшемуся значению «скользящего среднего» (программа ***wolf-corr.jac***, см. **Приложение П2.4**).

Корреляция между вычисленными значениями радиуса и значениями III компоненты составляет **0,375**, в то время, как корреляция между значениями скользящего среднего и значениями радиуса и III компоненты составляет, соответственно, **0,018** и **0,073**.Очевидно, что применение «метод скользящего среднего» для исследования внутренних закономерностей динамики солнечной активности лишено всякого смысла.

С другой стороны, обнаруживаются значительные корреляции между радиусом $\boldsymbol{R}_{I,II}$, вычисленным по значениям I и II главных компонент, и радиусом $\boldsymbol{R}_{IV,V,VI}$, вычисленным по значениям компонент IV, V и VI (надо отметить, что в соответствии с данными **Табл.3** эти компоненты являются значимыми для статистического описания исследуемого процесса). Значение коэффициента корреляции между этими параметрами составляет **0, 465**, что уже превышает корреляцию между значениями радиуса $\boldsymbol{R}_{I,II}$ и значениями III компоненты. Кстати, коэффициент корреляции между значениями III компоненты и радиусом $\boldsymbol{R}_{IV,V,VI}$ составляет **0,484**. Это неоспоримо свидетельствует о наличии существенных внутренних зависимостей в динамике солнечной активности, выражаемой даже таким косвенно-опосредованным показателем, как числа Вольфа.

Следовательно, в ходе проводимого анализа данных необходимо уделить внимание поведению траектории исследуемого процесса в фазовом пространстве IV, V и VI компонент.

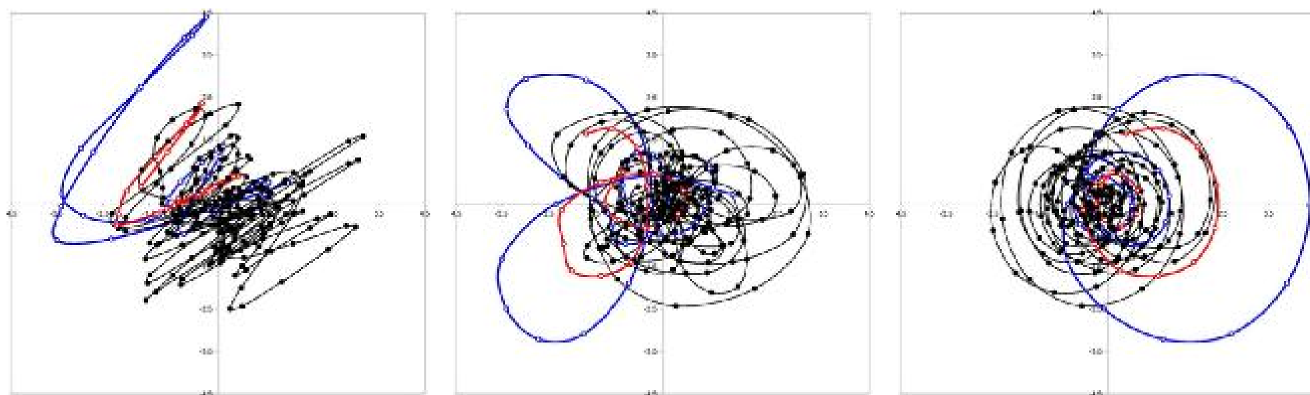


Рис.5. Проекция объектов на плоскость: IV-V, IV-VI и V-VI главных компонент

Проявления периодических процессов заметны, но дать им какое-то однозначное толкование на основании проекций (**Рис.5**) невозможно. При этом вполне отчетливо выделяются годы «минимума Далтона», что должно навести на мысль о его неслучайной природе. Удовлетворимся тем, что сильно коррелирующую с общей амплитудой процесса комбинацию IV, V и VI компонент обозначим как *«фактор X»*, и посмотрим на поведение его и энергетического *«фактора E»* на фоне уже знакомого ряда среднегодовых чисел Вольфа (**Рис.6**).

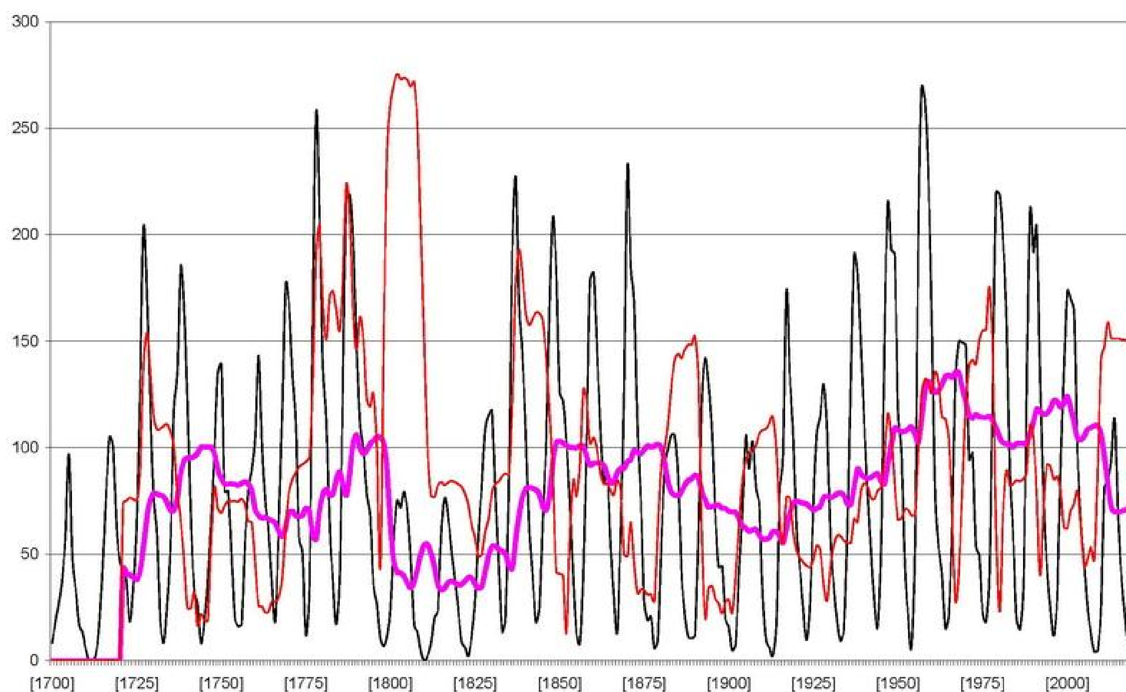


Рис.6. Исходный ряд среднегодовых чисел Вольфа, факторы «E» и «X»

Черным цветом показан график изменения среднегодовых чисел Вольфа, фиолетовым – изменения «*фактора E*», красным – изменения «*фактора X*». Ординаты для графиков факторов условны, их значения выражают только относительные колебания.

Небезынтересно будет взглянуть и на поведение исходных признаков (лагов лет) в построенном методом главных компонент фазовом пространстве. В типичном случае (лаг 22 года) графики процесса получаются достаточно «короткими», поэтому для начала увеличим лаг до 69 лет (программа ***wolf-deep.jac***, см. **Приложение П2.5**).

Подтверждением допустимости использования такого лага лет служат значения «старших» собственных чисел, причем не сами значения, а накопленная доля общей дисперсии первых шести компонент. Как и в предыдущих расчетах, значимыми остаются компоненты I-VI. Воспользуемся распечаткой матрицы собственных векторов, и используем её в качестве основы для построения проекций признаков (лагов лет) на фазовые плоскости главных компонент.

Первые три проекции показывают поведение лагов лет в пространстве I-III главных компонент, и отражают уже привычную цикличность, сопряженную с переменной общей энергетикой динамического процесса солнечной активности (**Рис.7**):

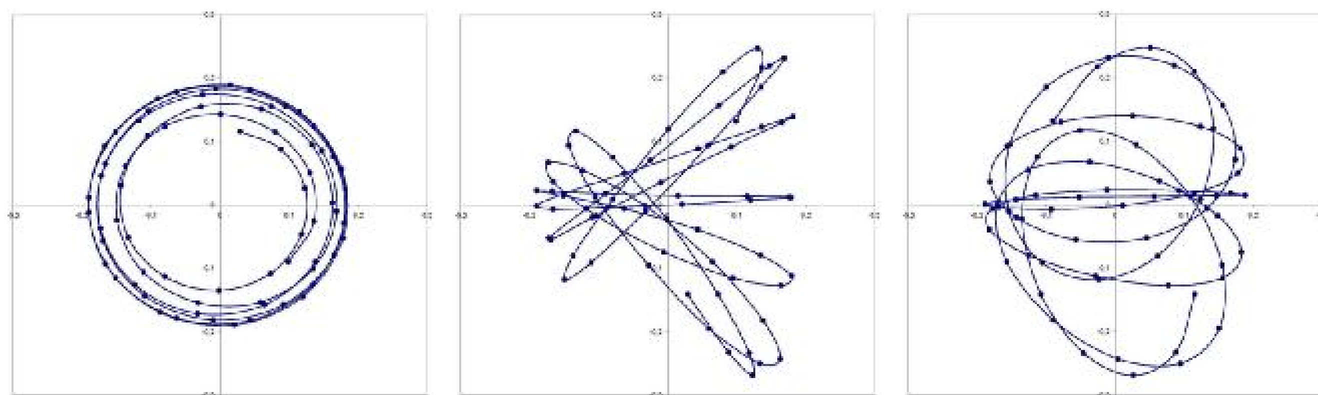


Рис.7. Фазовые портреты лага лет в пространстве I-II, I-III и II-III главных компонент

Конечно, после проведенного исследования поведения траектории объектов-лет в пространстве первых трёх главных компонент такие фазовые портреты оказываются вполне ожидаемыми. Уже понятно, что процесс имеет ярко выраженную цикличность. С другой стороны, эта цикличность прочно связана с изменением энергетической составляющей – и вот здесь фазовые портреты лагов лет в пространстве III компоненты наводят на мысль, что такие изменения вовсе не случайны, что существует вполне устойчивый механизм, систематически «разворачивающий» плоскость вращения лагов лет относительно III главной компоненты.

Посмотрим ещё глубже, не отыщем ли каких-нибудь доселе скрытых закономерностей и там…

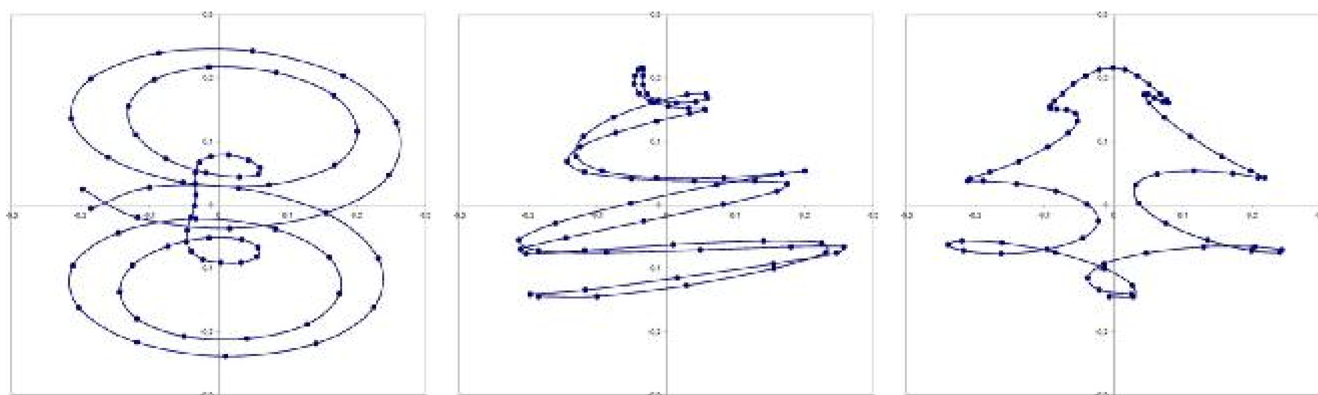


Рис.8. Фазовые портреты лага лет в пространстве IV-V, IV-VI и V-VI главных компонент

Выходит, кроме уже известной «воронки», связанной с общей динамикой появления солнечных пятен, есть и ещё… И не одна, а сразу две. Воображаемая точка лага лет описывает в пространстве IV-VI главных компонент траекторию, отчасти напоминающую две «воронки», соединенные узкими частями через «перемычку». Соответственно, объединяющий эффекты IV-VI компонент «фактор X» сначала как бы «сворачивается» до минимальных амплитуд по одной из связанных «воронок», потом проходит без каких-либо резких изменений через «перемычку», а потом «раскручивается» по второй «воронке»… И так снова и снова, в течение многих лет.

Выбрав в качестве лага 69 лет, видим уже как минимум четырехкратное воспроизведение этого сложного, глубоко скрытого квазициклического процесса за всю историю наблюдений солнечной активности и фиксации среднегодовых значений чисел Вольфа. Так что *это* – не случайность, и не следствие «ошибок метода».

Это существует на самом деле, и – *надеюсь!* – в недалеком будущем прояснится и физическая природа продемонстрированной закономерности.

5. Возражения

Конечно, возражения будут. Слишком долго на динамику солнечной активности смотрели поверхностно, ограничиваясь построением таких простейших моделей, которые, как бы воспроизводя внешние эффекты изменений в наблюдаемых проявлениях активности, позволяли удовлетвориться тривиальными объяснениями. Ну, есть цикличность в появлении и исчезновении пятен на Солнце. Ну, посчитали продолжительность цикла – 11 лет (примерно). Попытались как-то связать[17] эту цикличность с её земными проявлениями. На том, по сути, и успокоились.

Конечно, с опубликованием этой работы претензии автору будут предъявляться как по поводу метода выявления закономерностей в проявлениях солнечной активности, так и по части избыточности описания обнаруженных явлений.

Рассмотрим влияние методики учета предыстории текущего состояния процесса. Немного изменим программу вычислений, заменив реальные значения среднегодовых чисел Вольфа случайными значениями, подчиняющимися тем же законам распределения (сгенерируем их с теми же параметрами, что и у чисел реального ряда, $\boldsymbol{w}_{min}$=0, $\boldsymbol{w}_{max}$=269,2), сохранив длину ряда. Вычисления произведены программой ***wolf-rand.jac*** (см. **Приложение П2.6**).

Прежде всего обратим внимание на полученные собственные числа (**Табл.4**). Налицо более «плавное» уменьшение информационной значимости компонент, причем концентрации информации в «старших» компонентах не происходит.

Табл.4. Собственные числа (дисперсии компонент) для случайного ряда

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Λ	1,49	1,46	1,43	1,18	1,11	1,09	1,09	1,08	1,06	1,00	0,96
%	6,77	6,64	6,48	5,35	5,04	4,97	4,95	4,91	4,83	4,55	4,37
Σ%	6,77	13,40	19,88	25,23	30,28	35,25	40,20	45,11	49,94	54,49	58,86

Поведение объектов («лет») еще более характерно (**Рис.9**). Нигде не наблюдается той цикличности, которая была наглядно продемонстрирована ранее.

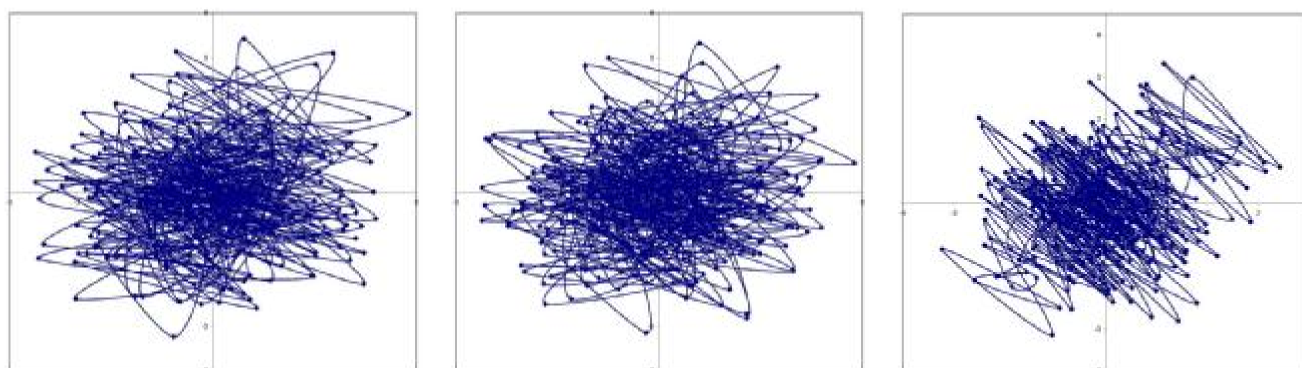


Рис.9. Проекции объектов случайного ряда на плоскости I-II, I-III и II-III главных компонент

Очевидно, что подобная картина будет наблюдаться и во всех следующих проекциях…

Настала пора сравнить две модели – традиционную (метод скользящего среднего) и новационную (метод главных компонент). Сторонники традиционной модели вправе заявить: наша модель учитывает и краткосрочную, и долгосрочную динамику солнечной активности. Хорошо, попробуем использовать данные, полученные традиционным моделированием, как исходные для анализа методом главных компонент.

---

[17] А.Л.Чижевский «Земное эхо солнечных бурь» — М: Мысль, 1973

Для вычислений воспользуемся программой ***wolf-comp.jac*** (см. **Приложение П2.7**). Сначала получим модельные значения традиционным способом, а потом применим к ним стандартную схему вычисления главных компонент с привычным 22-летним лагом.

Полученные дисперсии компонент (**Табл.5**) показывают, что полноценно-значимыми являются лишь компоненты I-III. Нно всё же бросим взгляд на поведение объектов-лет в пространстве до VI главной компоненты (в том подмножестве, значимость которого достигает 99%).

Табл.5. Собственные числа (дисперсии компонент) для традиционной модели

	I	**II**	**III**	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Λ	9,04	9,00	2,39	0,78	0,34	0,29	0,09	0,03	0,01	0,01	0,01
%	41,09	40,90	10,87	3,56	1,52	1,31	0,42	0,14	0,06	0,05	0,03
Σ%	**41,09**	**81,99**	**92,87**	96,43	97,96	99,26	99,69	99,83	99,89	99,94	99,97

И вот, наконец – фазовые портреты поведения траектории объектов (лет) в пространстве наиболее значимых компонент (**Рис.10**):

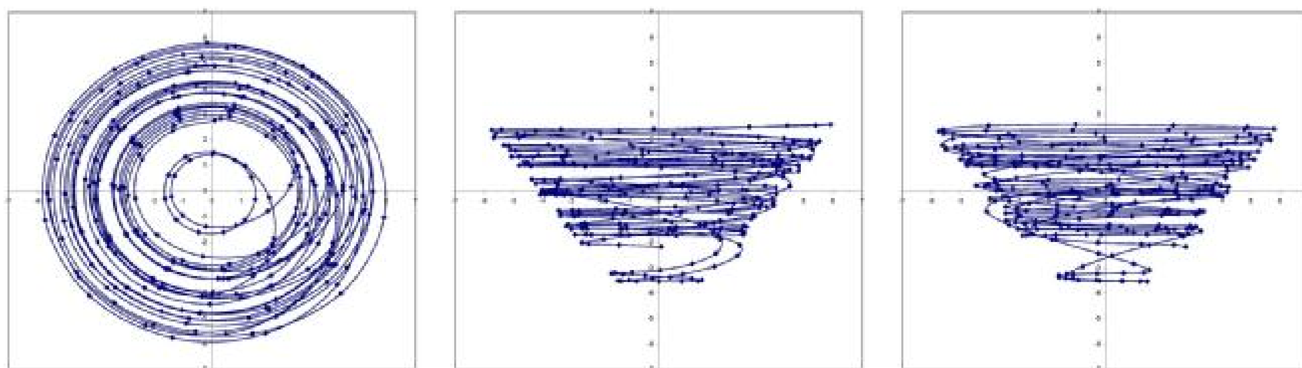


Рис.10. Фазовые портреты традиционной модели в плоскости I-II, I-III и II-III главных компонент

Похоже на рисунки, относящиеся к новационной модели? – да, конечно. Но какое-то оно всё… слишком гладкое, слишком геометрическое. Да и следующие компоненты какие-то малоинформативные (**Рис.11)**:

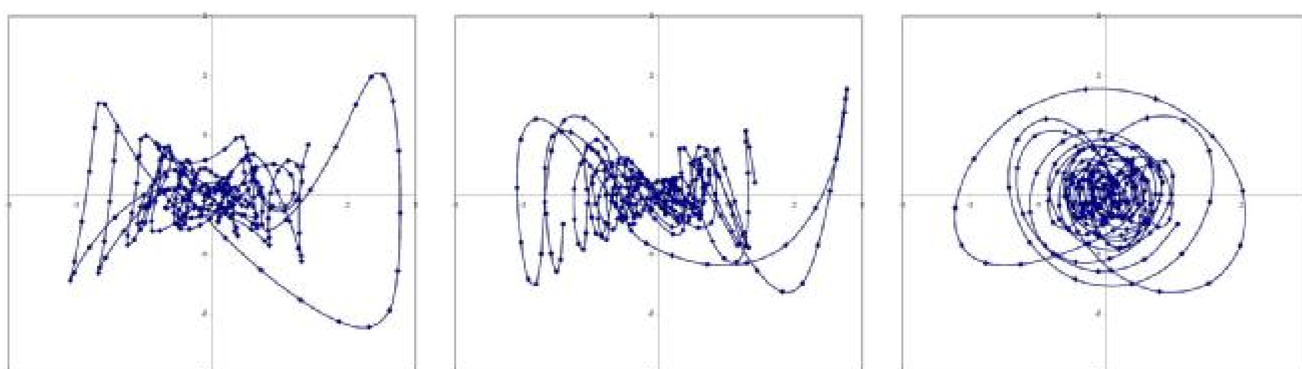


Рис.11. Фазовые портреты традиционной модели в плоскости IV-V, IV-VI и V-VI главных компонент

Применение принудительной фильтрации в виде метода скользящего среднего привело к утрате представлений о зависимостях второго порядка. Жаль, но использование традиционной модели делает исследователя подслеповатым, и при всём желании он не разглядит эффектов, лежащих глубже простых, тривиальных пульсаций, описываемых тригонометрическими функциями вкупе со «скользящим средним». При таком традиционном подходе не стоит даже и заикаться о том, чтобы посмотреть на поведение лагов лет в пространстве главных компонент, поскольку из модельных данных эти эффекты исчезли.

Безусловно, множество возможных возражений не ограничивается двумя, рассмотренными выше. Однако представляется справедливым попросить (на будущее) всех критиков предлагаемого подхода заранее, до предъявления автору претензий, самостоятельно выполнить вычислительную проверку своих аргументов, благо весь инструментарий для этого доступен, открыт и (*какой ужас!*) совершенно бесплатен.

6. Заключение

Итак, для детального исследования были взяты данные, известные человечеству на протяжении сотен лет. К этим данным был применен метод, известный (как подход и математический аппарат) уже более ста лет. Единственной новацией стало применение инструмента, позволяющего исследователю не сосредотачиваться на тонкостях машинной реализации тех или иных вычислений, но направлять свой интеллект и любознательность на изучение самого явления, благо создание и выполнение схем обработки данных (ЯКОБИ-программ) с помощью калькулятора многомерной статистики не требует сверхъестественных талантов и усилий.

Обнаруженные зависимости еще ждут своего объяснения, еще только предстоит найти и сформулировать физическую причину таких проявлений динамики солнечной активности. Скорее всего, для глубокого изучения явлений понадобится провести аналогичную обработку более детальной информации (среднемесячных чисел Вольфа, например). Неизбежно привлечение данных объективных измерений – однако для таких параметров период наблюдений окажется существенно меньшим по продолжительности.

По всей видимости, откроется влияние выделенных в данном исследовании «фактора E» и «фактора X» не только на физические процессы, но и на биосферу Земли вообще, и историю человечества в частности (особенно интересным видится сопоставление лет, «отмеченных» высокими значениями «фактора X» с рождением, жизнью и творчеством ярких личностей).

Разумеется, данное исследование не претендует на определение «истины в последней инстанции», в отечественной традиции существует не один способ усомниться[18] в правомочности подобных “*штудий*”. Тем не менее, описываемые закономерности существуют и, как бы кому-то не хотелось избегнуть их упоминания (тем более – называния настоящим, подлинным именем), с этим придется смириться. Те же благодарные читатели, которые рискнут продолжить начатое этой работой изучение доселе скрытых от внимания общества явлений, отныне имеют в своем распоряжении все необходимые данные и инструменты для их анализа. Для бескорыстного добывания знаний об окружающем нас Мире.

Ради всего человечества[19].

---

[18] В.Семи-Булатов «Письмо к ученому соседу» (*цит. по*: А.П.Чехов – Полн. собр. соч. и писем в 30-ти томах) – Том 1, с.11-17. – М: «Наука», 1974

[19] *англ.* «For all mankind» – слова, произнесённые Нилом Олденом Армстронгом (*англ.* Neil Alden Armstrong; 5 августа 1930 – 25 августа 2012), первым человеком, шагнувшим на поверхность Луны, 20 июля 1969 года (автор был косвенным свидетелем этого события, слушая прямой эфир «Голоса Америки» недалеко от Новосибирска)

Приложения

П1. Среднегодовые числа Вольфа (1700-2019 годы)

Приводимая таблица содержит значения[20] среднегодовых чисел Вольфа, для компактности представления сгруппированные по десятилетиям; в заголовке указано смещение года от начала соответствующего десятилетнего периода.

Табл.П1.1. Среднегодовые числа Вольфа по десятилетиям за период 1700-2019 годов

Год	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
1700	8,3	18,3	26,7	38,3	60,0	96,7	48,3	33,3	16,7	13,3
1710	5,0	0,0	0,0	3,3	18,3	45,0	78,3	105,0	100,0	65,0
1720	46,7	43,3	36,7	18,3	35,0	66,7	130,0	203,3	171,7	121,7
1730	78,3	58,3	18,3	8,3	26,7	56,7	116,7	135,0	185,0	168,3
1740	121,7	66,7	33,3	26,7	8,3	18,3	36,7	66,7	100,0	134,8
1750	139,0	79,5	79,7	51,2	20,3	16,0	17,0	54,0	79,3	90,0
1760	104,8	143,2	102,0	75,2	60,7	34,8	19,0	63,0	116,3	176,8
1770	168,0	136,0	110,8	58,0	51,0	11,7	33,0	154,2	257,2	209,8
1780	141,3	113,5	64,2	38,0	17,0	40,2	138,2	220,0	218,2	196,8
1790	149,8	111,0	100,0	78,2	68,3	35,5	26,7	10,7	6,8	11,3
1800	24,2	56,7	75,0	71,8	79,2	70,3	46,8	16,8	13,5	4,2
1810	0,0	2,3	8,3	20,3	23,2	59,0	76,3	68,3	52,9	38,5
1820	24,2	9,2	6,3	2,2	11,4	28,2	59,9	83,0	108,5	115,2
1830	117,4	80,8	44,3	13,4	19,5	85,8	192,7	227,3	168,7	143,0
1840	105,5	63,3	40,3	18,1	25,1	65,8	102,7	166,3	208,3	182,5
1850	126,3	122,0	102,7	74,1	39,0	12,7	8,2	43,4	104,4	178,3
1860	182,2	146,6	112,1	83,5	89,2	57,8	30,7	13,9	62,8	123,6
1870	232,0	185,3	169,2	110,1	74,5	28,3	18,9	20,7	5,7	10,0
1880	53,7	90,5	99,0	106,1	105,8	86,3	42,4	21,8	11,2	10,4
1890	11,8	59,5	121,7	142,0	130,0	106,6	69,4	43,8	44,4	20,2
1900	15,7	4,6	8,5	40,8	70,1	105,5	90,1	102,8	80,9	73,2
1910	30,9	9,5	6,0	2,4	16,1	79,0	95,0	173,6	134,6	105,7
1920	62,7	43,5	23,7	9,7	27,9	74,0	106,5	114,7	129,7	108,2
1930	59,4	35,1	18,6	9,2	14,6	60,2	132,8	190,6	182,6	148,0
1940	113,0	79,2	50,8	27,1	16,1	55,3	154,3	214,7	193,0	190,7
1950	118,9	98,3	45,0	20,1	6,6	54,2	200,7	269,2	261,7	225,1
1960	159,0	76,4	53,4	39,9	15,0	22,0	66,8	132,8	150,0	149,3
1970	148,0	94,4	97,6	54,1	49,2	22,5	18,4	39,3	131,0	220,1
1980	218,8	198,8	162,3	91,0	60,5	20,6	14,8	33,9	123,0	211,1
1990	191,8	203,3	133,0	76,1	44,9	25,1	11,6	28,9	88,3	136,3
2000	173,8	170,3	163,6	99,3	65,3	45,8	24,7	12,6	4,2	4,8
2010	24,9	80,8	84,5	94,0	113,3	69,8	39,8	21,7	7,0	3,6

[20] В работе использованы значения среднегодовых чисел Вольфа, опубликованные на веб-сайте Мирового Центра Данных (SILSO data/image, Royal Observatory of Belgium, Brussels), http://sidc.be/silso/datafiles

П2. ЯКОБИ-ПРОГРАММЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Приводится только содержательная часть программ; директивы управления протоколом, промежуточной печати и проецирования объектов/признаков на фазовые плоскости не показаны.

П2.1. Программа **wolf-long.jac** – расчет корреляций между текущим и предшествующими годами наблюдений солнечной активности за длительный период, исходные данные **wolf.std** – ряд среднегодовых чисел Вольфа

```
* читать данные * wolf
* ввести объекты с номерами * ][ ][
* создать признаки * [1-149]
* копировать значения признака * ][ [0] ]0[
* сдвинуть столбцы * ][ ]0[ +1
* исключить объекты с отсутствием данных * ][ ][
* центрировать столбцы * ][ ][
* нормировать столбцы * ][ ][
* вычислить главные компоненты * ][ ][ 1
* печатать ковариации(корреляции) * [0] [0-9]
* * [0] [10-19]
* * [0] [20-29]
* * [0] [30-39]
* * [0] [40-49]
* * [0] [50-59]
* * [0] [60-69]
* * [0] [70-79]
* * [0] [80-89]
* * [0] [90-99]
* * [0] [100-109]
* * [0] [110-119]
* * [0] [120-129]
* * [0] [130-139]
* * [0] [140-149]
* конец *
```

П2.2. Программа **wolf-trad.jac** – модельный расчет динамики солнечной активности на основе тригонометрической функции и скользящего среднего, исходные данные **wolf.std** – ряд среднегодовых чисел Вольфа

```
* читать данные * wolf
* ввести объекты с номерами * ][ ][
* создать признаки * [1-10]
* копировать значения признака * ][ [0] ]0[
* сдвинуть столбцы * ][ [1-10] +1
* создать признаки * [77,88,99]
* присвоить значения * ][ [77] 0
* изменить значения с шагом * ]1700[ [77] +0.5754
* сдвинуть столбцы * ][ [77] +3
* стандартная функция * ][ [77] Sin
* действие с константой * ][ [77] +1
* действие с признаком * ][ [88] : [0-10]
* присвоить значения * ][ [99] 1
* действие с признаком * ][ [99] * [77,88]
* записать объекты с номерами * wolf-trad ][ [0,88,99]
* конец *
```

П2.3. Программа **wolf-nova.jac** – расчет главных компонент с учетом 22-летнего лага, исходные данные **wolf.std** – ряд среднегодовых чисел Вольфа

```
* читать данные * wolf
* ввести объекты с номерами * ][ ][
* создать признаки * [1-21]
* копировать значения признака * ][ [0] ]0[
* сдвинуть столбцы * ][ ]0[ +1
* исключить объекты с отсутствием данных * ][ ][
* центрировать столбцы * ][ ][
* нормировать столбцы * ][ ][
* вычислить главные компоненты * ][ ][ 1
* печатать дисперсии компонент * ][ 0.90
* записать объекты с номерами * wolf-nova ][ [1-6]
* конец *
```

П2.4. Программа **wolf-corr.jac** – расчет корреляций факторов новационной модели и скользящего среднего традиционной модели, исходные данные **wolf.std** – ряд среднегодовых чисел Вольфа; как подпрограммы вызываются ранее представленные программы **wolf-trad.jac** и **wolf-nova.jac**

```
* выполнить * wolf-trad
* записывать данные * wolf-aver
* записать объекты с номерами * ][ [0,88,99]
* закончить запись *
* очистить память данных *
* выполнить * wolf-nova
* исключить фрагмент матрицы данных * [] ]1-6[
* создать признаки * [12,46]
* присвоить значения * ][ [12] 0
* стандартная функция * ][ [1-2] Sqr
* действие с признаком * ][ [12] + [1-2]
* стандартная функция * ][ [12] Sqrt
* присвоить значения * ][ [46] 0
* стандартная функция * ][ [4-6] Sqr
* действие с признаком * ][ [46] + [4-6]
* стандартная функция * ][ [46] Sqrt
* записывать данные * wolf-comp
* записать объекты с номерами * ][ ][
* закончить запись *
* очистить память данных *
* создать признаки * [0,1-6,12,46,88,99]
* читать данные * wolf-aver
* ввести объекты с номерами * ][ [0,88,99]
* читать данные * wolf-comp
* ввести объекты с номерами * ][ [1-6,12,46]
* записать объекты с номерами * wolf-summ ][ ][
* исключить фрагмент матрицы данных * [] ]0,3,12,46,88[
* исключить объекты с отсутствием данных * ][ ][
* центрировать столбцы * ][ ][
* нормировать столбцы * ][ ][
* вычислить главные компоненты * ][ ][
* печатать ковариации(корреляции) * ][ ][
* конец *
```

П2.5. Программа **wolf-deep.jac** – вычисление собственных векторов при заведомо большом лаге лет, исходные данные **wolf.std** – ряд среднегодовых чисел Вольфа

```
* читать данные * wolf
* ввести объекты с номерами * ][ [0]
* создать признаки * [1-68]
* копировать значения признака * ][ [0] ]0[
* сдвинуть столбцы * ][ ]0[ +1
* исключить объекты с отсутствием данных * ][ ][
* центрировать столбцы * ][ ][
* нормировать столбцы * ][ ][
* вычислить главные компоненты * ][ ][
* печатать дисперсии компонент * ][ 0.7
* печатать собственные векторы * ][ ][
* конец *
```

П2.6. Программа **wolf-rand.jac** – расчет главных компонент с учетом 22-летнего лага, исходные данные – ряд случайных чисел с теми же параметрами, что и исходный ряд среднегодовых чисел Вольфа

```
* читать данные * wolf
* ввести объекты с номерами * ][ ][
* присвоить случайные значения * ][ [0] R 0 269.2
* создать признаки * [1-21]
* копировать значения признака * ][ [0] ]0[
* сдвинуть столбцы * ][ ]0[ +1
* исключить объекты с отсутствием данных * ][ ][
* центрировать столбцы * ][ ][
* нормировать столбцы * ][ ][
* вычислить главные компоненты * ][ ][
* печатать дисперсии компонент * ][ 0.75
* записать объекты с номерами * wolf-rand ][ [1-6]
* конец *
```

П2.7. Программа **wolf-comp.jac** – расчет главных компонент с учетом 22-летнего лага, исходные данные – модельный ряд, полученный из исходного ряда среднегодовых чисел Вольфа

```
* выполнить * wolf-trad
* копировать значения признака * ][ [99] [0]
* исключить фрагмент матрицы данных * [] ]0[
* создать признаки * [1-21]
* копировать значения признака * ][ [0] ]0[
* сдвинуть столбцы * ][ ]0[ +1
* исключить объекты с отсутствием данных * ][ ][
* центрировать столбцы * ][ ][
* нормировать столбцы * ][ ][
* вычислить главные компоненты * ][ ][
* печатать дисперсии компонент * ][ 0.9
* записать объекты с номерами * wolf-comp ][ [1-6]
* конец *
```